

ПРИМЕНЕНИЕ ТРАНСЗВУКОВОЙ ВОЗДУШНОЙ СТРУИ ДЛЯ ОХЛАЖДЕНИЯ НЕПРЕРЫВНОЛИТЫХ СЛИТКОВ НА МНЛЗ

Аннотация

Эффективным мероприятием, направленным на повышение качества поверхности слитка, является усовершенствование системы охлаждения слитка в зоне вторичного охлаждения МНЛЗ.

В зоне вторичного охлаждения используются системы охлаждения двух типов: водяное и водовоздушное, осуществляемые форсуночным способом.

Приведена классификация систем охлаждения непрерывно-литых слитков в зоне вторичного охлаждения. Обосновано применение трансзвуковых струй воздуха для охлаждения слитков.

Выполнено экспериментальное исследование газодинамических характеристик трансзвуковой газовой струи, на основании которого определено влияние геометрических и энергетических характеристик трансзвуковых струй воздуха на эффективность охлаждения.

На основании обработки экспериментальных данных получены уравнения подобия, которые могут быть использованы для определения давления воздуха, идущего на охлаждение, и коэффициентов теплоотдачи на поверхности слитка, необходимые при конструктивных расчетах системы воздушного охлаждения слитка.

Ключевые слова: непрерывно-литой слиток, зона вторичного охлаждения, МНЛЗ, трансзвуковая струя, уравнение подобия, теплоотдача.

Abstract

Classification of coolant systems of continuous casted ingots in a zone of secondary cooling is shown. Application of transonic jets of air for cooling of continuous casted ingots is proved.

The experimental research of gasdynamic characteristics of a transonic gas jet is executed and on the basis of this research an influence of geometrical and power characteristics of transonic jets of air on efficiency of cooling of continuous casted ingots is certain.

On the basis of treatment of experimental data the equations of similarity which can be used for definition of pressure of air and a heat transfer coefficients on a surface of ingots are received at constructive calculations of system of air cooling of an ingot on CCM.

Keywords: continuous casted ingot, secondary cooling zone, CCM, transonic jet, , equation of similarity, heat transfer.

Одним из перспективных направлений развития металлургии является совершенство-

вание процесса разливки стали. В настоящее время основным способом разливки является разливка на МНЛЗ. В свою очередь, непрерывная разливка стали на МНЛЗ является неотъемлемой частью современной технологии производства проката.

Разливка стали на МНЛЗ приводит к повышению прочности и пластических свойств непрерывно-литого слитка, а также к увеличению ударной вязкости и сопротивления усталостным нагрузкам по сравнению со сталью, разливаемой в изложницы.

Качество проката зависит от ряда факторов, к которым, в первую очередь, относится гладкость поверхности непрерывно-литого слитка.

Эффективным мероприятием, направленным на повышение качества поверхности слитка, является усовершенствование системы охлаждения слитка в зоне вторичного охлаждения МНЛЗ.

В зоне вторичного охлаждения используются системы охлаждения двух типов: водяное и водовоздушное, осуществляемые форсуночным способом.

Классификация систем охлаждения приведена на рис. 1. Существующие системы охлаждения обладают рядом недостатков.

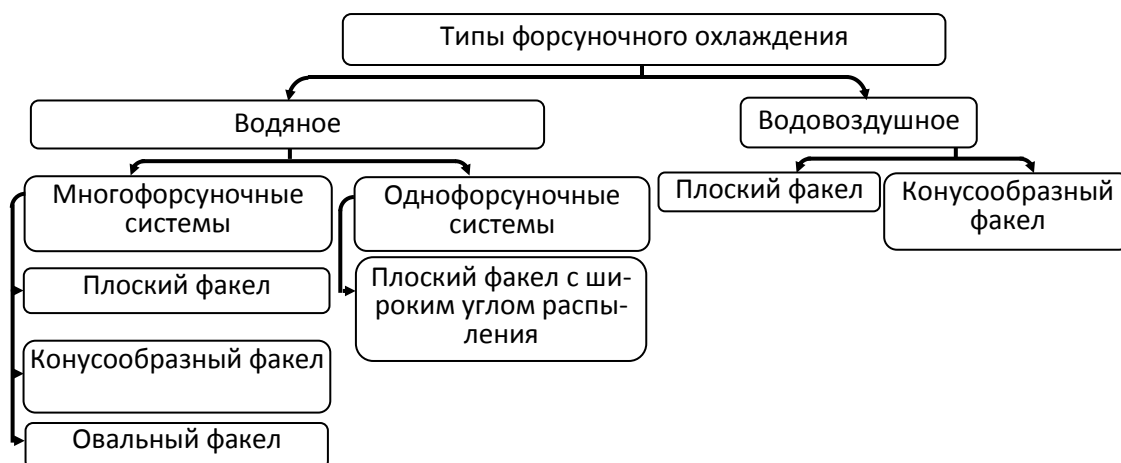


Рис. 1. Классификация существующих систем охлаждения непрерывно-литых слитков в зоне вторичного охлаждения

Одним из основных недостатков водяного охлаждения является образование поперечных трещин на поверхности слитка и, в особенности, на его гранях. Помимо этого наблюдается термоциклирование поверхности слитка. Перепад температур на отдельных участках слитка может достигать $150 \div 200^{\circ}\text{C}$.

К основным недостаткам водовоздушного охлаждения относятся:

- необходимость тщательной очистки воды перед форсунками для предотвращения их засорения, что создает существенные проблемы при эксплуатации системы охлаждения;
- образование трещин вследствие разной плотности распределения охлаждающей воды на поверхности слитка.

При необходимости очистки воды после зоны вторичного охлаждения в оборотных системах водоснабжения, доля капитальных затрат на систему охлаждения может составлять до 30 % от суммарных затрат на сооружение МНЛЗ [1]. В связи с этим перспективным явля-

ется использование только воздуха (без добавления воды) для охлаждения слитка в зоне вторичного охлаждения МНЛЗ, что исключает дорогостоящую водоподготовку.

Результаты первых попыток разработки систем исключительно воздушного охлаждения непрерывно-литых слитков представлены в работах [2; 3]. Экспериментальные исследования проводились при дозвуковых значениях скоростей воздуха (до 125 м/с). При таких значениях скоростей коэффициент теплоотдачи не превышал 100 Вт/м^2 , что в условиях действующей МНЛЗ приводило к увеличению длины зоны вторичного охлаждения и ухудшению качества слитка.

Помимо этого в работах [2; 3] указывается на нецелесообразность использования воздуха в качестве охлаждающей среды вследствие необходимости выработки большого количества сжатого воздуха и недостаточной интенсивности охлаждения. По данным [2; 3] при охлаждении слитка компрессорным воздухом коэффициент теплоотдачи находился в пределах $175 \div 200 \text{ Вт/м}^2$, а при охлаждении слитка воздухом от воздуходувки коэффициент теплоотдачи составлял $70 \div 125 \text{ Вт/м}^2 \text{ К}$.

Таким образом, затраты на сжатие воздуха практически не компенсируются повышением интенсивности охлаждения.

В данной работе предлагается использовать для охлаждения непрерывнолитого слитка во вторичной зоне охлаждения МНЛЗ трансзвуковые струи воздуха.

Использование трансзвуковых струй воздуха для охлаждения слитка вместо дозвуковых струй позволит:

- значительно снизить диссипацию энергии струи воздуха между соплом и поверхностью слитка, а следовательно, снизить расход воздуха, необходимого для охлаждения слитка;
- увеличить коэффициент теплоотдачи между поверхностью слитка и охлаждающим воздухом;
- расширить зону контакта струи с поверхностью слитка за счет более обширного растекания высокоскоростного потока воздуха.

При этом для достижения струей трансзвуковой скорости достаточно повысить давление воздуха перед соплом до 0,2 МПа.

Для оценки возможности реализации охлаждения трансзвуковыми струями выполнено экспериментальное исследование взаимодействия трансзвуковой струи воздуха с поверхностью непрерывно-литого слитка.

Схема экспериментального узла, представленная на рис. 2, сводится к экспериментальному исследованию процесса взаимодействия трансзвуковой струи воздуха с тупиковым каналом, днище которого имитировало поверхность слитка, а боковая поверхность канала имитировала поддерживающие ролики (см. рис. 2).

Суть эксперимента заключалась в измерении давления на днище канала при натекании на него струи воздуха. Для этого в тупиковом канале выполнены дренажные отверстия, которые соединены через импульсные трубки с групповым манометром, содержащим 20 рычажных сильфонных манометров.

Оценка точности измерения избыточного давления, а также расчет времени демпфирования волновых процессов в импульсных трубках проводились в соответствии с известными методиками [4–7]. Теплофизические и механические свойства сред и материалов взяты из работ [8; 9].

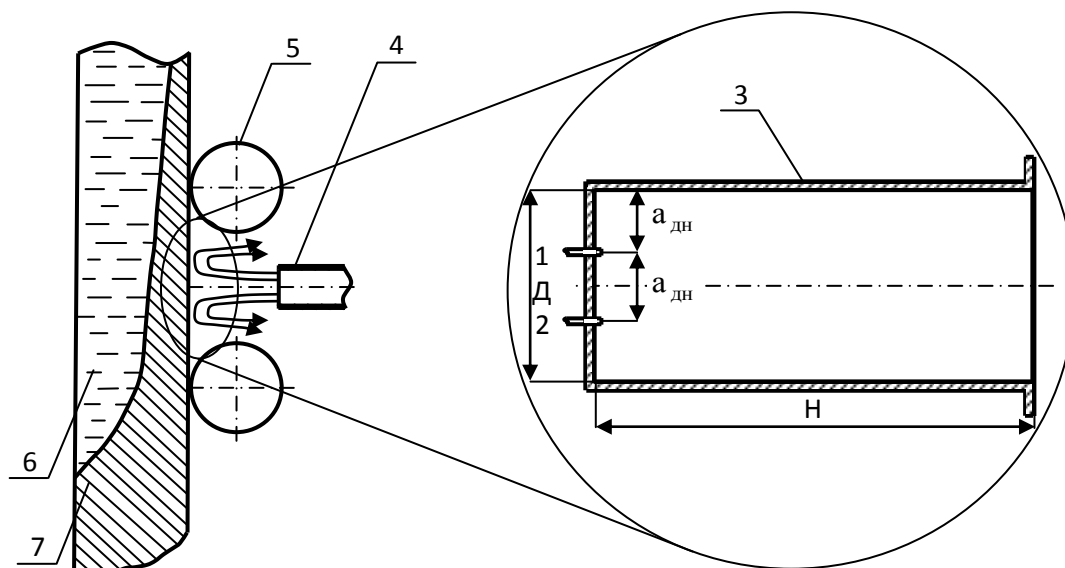


Рис. 2. Схема взаимодействия струи воздуха с поверхностью слитка:
 1 и 2 – дренажные отверстия импульсных линий; 3 – тупиковый канал;
 4 – сопло для подвода воздуха; 5 – поддерживающие ролики; 6 – жидкая фаза слитка;
 7 – твердая фаза слитка; $a_{\text{дн}}$ – шаг дренажных отверстий вдоль днища тупикового канала;
 H – глубина тупикового канала; D – диаметр тупикового канала

Размеры тупикового канала и сопла приняты в соответствии с геометрическим подобием зоны вторичного охлаждения МНЛЗ.

Эксперимент по фронтальному и боковому натеканию струи на тупиковый канал охватывал следующие значения газодинамических и геометрических параметров струи и тупикового канала:

- диаметр выходного отверстия сопла $d_0 = 0,012 \div 0,027$ м;
- диаметр тупикового канала $D = 0,04 \div 0,08$ м;
- глубина тупикового канала $H = 0,12 \div 0,24$ м;
- дренажные отверстия вдоль днища тупикового канала расположены с шагом $a_{\text{дн}} = 0,013 \div 0,027$ м;
- относительный диаметр тупикового канала $\bar{d} = d_0/D = 0,20 \div 0,44$;
- угол между осью сопла и осью канала $\varphi = 0^\circ \div 60^\circ$;
- относительное расстояние от выходного отверстия сопла до днища тупикового канала $\bar{h} = h/d_0 = 4,44 \div 20,30$
- абсолютное давление воздуха перед соплом $P_{c0} = 0,24 \div 2,12$ МПа .

В качестве примера в табл. 1 приведены результаты экспериментального исследования фронтального натекания трансзвуковой струи на тупиковый канал. Представлены значения давления воздуха $\bar{P}_{\text{абс д}}$ в дренажных отверстиях №1 и №2 (см. рис. 2) при различных давлениях воздуха перед соплом \bar{P}_{c0} , различных относительных диаметрах тупикового канала \bar{d} и относительном расстоянии от плоскости среза сопла до плоскости входного отверстия тупикового канала $\bar{h} = 0,26$.

Таблица 1

Результаты экспериментального исследования фронтального натекания
транзвуковой струи на тупиковый канал

$\bar{d} = 0,33$		$\bar{d} = 0,30$		$\bar{d} = 0,25$		$\bar{d} = 0,20$	
\bar{P}_{c0}	$\bar{P}_{абс д}$	\bar{P}_{c0}	$\bar{P}_{абс д}$	\bar{P}_{c0}	$\bar{P}_{абс д}$	\bar{P}_{c0}	$\bar{P}_{абс д}$
5,04	1,70	7,07	1,82	9,08	1,81	11,07	1,63
7,09	1,93	9,02	2,09	11,16	2,04	13,09	1,77
9,05	2,21	11,07	2,41	13,14	2,24	15,08	1,97
11,10	2,50	13,08	2,63	15,06	2,50	19,12	2,17
13,13	2,72	13,78	2,70	19,10	2,90	21,12	2,28

Для обобщения экспериментальных данных и получения зависимостей, связывающих геометрические и динамические характеристики сопла и газовой струи в виде критериальных уравнений, использовалась теория подобия.

В соответствии с [10–13] общая критериальная зависимость газодинамического подобия течения сжимаемых газовых потоков имеет следующий вид:

$$f(M_0, k, \bar{\rho}, \bar{I}_1, \dots, \bar{I}_n) = 0 \quad (1)$$

где k – число Пуассона (показатель адиабаты); $\bar{\rho}$ – симплекс, учитывающий разность температур потока и окружающей среды, $\bar{I}_1, \dots, \bar{I}_n$ – симплексы, учитывающие конструктивные особенности данной модели.

Из критериальной зависимости (1) исключен критерий Маха, поскольку экспериментальные исследования выполнены практически при одном и том же значении этого критерия. Экспериментальные исследования проводились с изотермической газовой струей, следовательно, из уравнения (1) исключен симплекс $\bar{\rho}$. Использование воздуха в качестве газа, взаимодействующего с тупиковым каналом, позволяет исключить из критериальной зависимости (1) число Пуассона.

Вместе с тем, в критериальную зависимость (1) вводятся симплексы $\bar{P}_{абс д}$, \bar{P}_{c0} , \bar{d} , \bar{h} и Φ .

Симплексы, характеризующие относительное давление воздуха на днище тупикового канала и давление воздуха перед соплом, определяются соотношениями:

$$\bar{P}_{абс д} = P_{атм} + P_{абс д} / P_{атм} \quad (2)$$

$$\bar{P}_{c0} = P_{атм} + P_{c0} / P_{атм} \quad (3)$$

Таким образом, критериальные зависимости газодинамического подобия для случаев фронтального и бокового натекания представляются следующим образом:

$$\bar{P}_{абс д} = c \cdot \bar{P}_{c0}^n \cdot \bar{d}^m \cdot \bar{h}^k, \quad (4)$$

$$\bar{P}_{абс д} = c \cdot \bar{P}_{c0}^n \cdot \bar{d}^m \cdot \bar{h}^k \cdot \Phi^q. \quad (5)$$

Коэффициенты c , n , m , k и q в уравнениях (4) и (5), вычисленные по результатам экспериментальных данных, представлены в табл. 2.

Коэффициенты критериальных уравнений при фронтальном
и боковом натекании струи

Коэффициенты Значения критерия Рейнольдса	c	n	m	k	q
$2,33 \cdot 10^5 < Re < 5,26 \cdot 10^5$	5,36	0,44	0,79	0,78	-
$2,33 \cdot 10^5 < Re < 4,67 \cdot 10^5$	11,38	0,99	0,82	-0,43	-0,37

Полученные с помощью теории подобия уравнения (4) и (5) в соответствии с методикой оценки погрешности измерений [14] описывают экспериментальные значения давления воздуха на днище тупикового канала с точностью до $\pm 25\%$.

Определив величину давления воздуха на поверхность непрерывно-литого слитка можно рассчитать значения скорости воздуха вдоль поверхности слитка, что необходимо для определения коэффициента теплоотдачи от поверхности слитка к струе охлаждающего воздуха при выполнении конструктивных расчетов системы охлаждения.

Выводы

Уравнения (4) и (5) с учетом значений коэффициентов, представленных в табл. 2, могут быть использованы для определения давления воздуха и коэффициента теплоотдачи на поверхности непрерывно-литого слитка при расчете системы воздушного охлаждения слитка на МНЛЗ.

В качестве перспективы для дальнейших исследований следует считать математическое моделирование процесса взаимодействия трансзвуковых струй воздуха с поверхностью слитка и поддерживающими роликами, что необходимо для проектно-конструкторских разработок опытно-промышленного образца системы охлаждения слитков.

Список использованных источников

1. Смирнов А. Н., Куберский С. В., Штепан Е. В. Непрерывная разливка стали. Донецк: изд-во ДонНТУ, 2011. – 482 с.
2. Освоение непрерывной разливки стали / А. Д. Акименко [и др.]. – Л.: Судпромгиз, 1960. – 228 с.
3. Скворцов А.А., Акименко А. Д. Теплопередача и затвердевание стали в установках непрерывной разливки. – М.: Металлургия, 1966. – 191 с.
4. Браславский Д.А., Петров В. В. Точность измерительных устройств. – М.: Машиностроение, 1976. – 278 с.
5. Брянский Л. Н., Дойников А. С. Краткий справочник метролога: справочник. – М.: Изд-во стандартов, 1991. – 79 с.
6. Гонек Н. Ф. Манометры. – Л.: Машиностроение, 1979. – 176 с.
7. Ратанов Г. С. Методы и средства измерений динамических давлений. – Томь: Изд-во Томского университета, 1986. – 108 с.

8. Варгафтик Н. Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей: справочник. – М.: Наука, 1972. – 720 с.
9. Енохович А. С. Справочник по физике: справочник. – М.: Просвещение, 1990. – 384 с.
10. Гречко А. В., Нестеренко Р. Д., Кудинов Ю. А. Практика физического моделирования на металлургическом заводе. – М.: Металлургия, 1976. – 224 с.
11. Максимов Ю. М., Рожков И. М., Саакян М. А. Математическое моделирование металлургических процессов. – М.: Металлургия, 1976. – 288 с.
12. Гухман А. А. Введение в теорию подобия. – М.: Высшая школа, 1973. – 295 с.
13. Алабужев П. М., Геронимус В. Б., Минкевич Л. М., Шеховцов Б. А. Теория подобия и размерностей. Моделирование. – М.: Высшая школа, 1968. – 206 с.
14. Крейт Ф., Блэк У. Основы теплопередачи. – М.: Мир, 1983. – 512 с.

УДК 669.045

Ю. А. Гичев, О. В. Переверзева

Национальная металлургическая академия Украины, г. Днепропетровск, Украина

ВОССТАНОВИТЕЛЬНЫЙ ПОТЕНЦИАЛ ОТХОДЯЩИХ ГАЗОВ СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ КОНВЕРТЕРОВ

Аннотация

Рассмотрены два варианта размещения реактора-восстановителя на газоотводящем тракте конвертера. Размещение реактора на высокотемпературном газе позволяет одновременно с использованием восстановительного потенциала газа утилизировать его физическую теплоту. При использовании охлажденного газа возникает проблема нагрева газа перед подачей его в реактор, что осуществляется путем частичного сжигания газа.

В результате оценки восстановительной способности газа установлено, что для получения высокометаллизованного продукта газ следует подавать в реактор-восстановитель в течение нескольких продувок конвертера, образующих цикл восстановления. При этом процесс восстановления синхронизирован с выплавкой стали. Установлено также, что использование высокотемпературного газа в 2–3 раза эффективнее по сравнению с использованием охлажденного газа, но вместе с этим использование газа в качестве восстановителя как до, так и после газоочистки, вполне целесообразно. По степени использования СО восстановление конвертерным газом не уступает другим известным технологиям прямого получения железа.

Ключевые слова: конвертерный газ, железорудное сырье, металлизация, реактор-восстановитель, продувка.

Abstract

Two variants of placing the reactor on a reducing gas exhaust path converter. Placing high-temperature gas reactor allows simultaneous reduction potential using gas recycle its physical